

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БЕРЕЖНА ОЛЕНА ВАЛЕРІЇВНА



УДК 621.791.92

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ
ЗНОСОСТІЙКОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАВАРЮВАННЯ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та спорідненні процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ), професор кафедри
«Зварювальне виробництво»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Фальченко Юрій В'ячеславович,
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
НАН України (м. Київ), завідувач відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів;

доктор технічних наук, професор
Гулаков Сергій Володимирович,
Приазовський державний технічний університет
(м. Маріуполь), професор кафедри «Металургія і технологія зварювального виробництва»

доктор технічних наук, професор
Болотов Геннадій Павлович,
Чернігівський національний технологічний університет (м. Чернігів), професор кафедри
«Технологія зварювання та будівництва»

Захист відбудеться «25» червня 2018 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37

Автореферат розіслано « » травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д26.002.15
доктор технічних наук, професор



Р.М. Рижев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Можливості підвищення продуктивності та збільшення терміну служби обладнання визначаються експлуатаційною стійкістю деталей, що піддаються в процесі роботи зношуванню та низька експлуатаційна стійкість яких приводить до передчасного виходу машин з ладу, зниженню їх функціональних якостей. З точки зору підвищення ефективності відновлення працездатності зношених деталей, що мають невеликі діаметральні розміри та незначні втрати робочої поверхні, шляхом їх нарощування до номінальних розмірів успішно застосовується електроконтактне наварювання стрічками, які при простоті виготовлення дозволяють одержувати за один прохід приварений шар необхідної ширини та потрібного хімічного складу.

Електроконтактне наварювання стрічками є електротермічним процесом зі складною взаємодією між параметрами, характер зміни яких у реальних умовах залежить від цілого ряду факторів, які протягом імпульсу зварювального струму змінюються у широких межах, в результаті чого формування остаточної структури нанесеного шару характеризується неоднорідністю дисперсності та механічних властивостей, а також різною чутливістю до концентрації напружень. Регламентування комплексу показників фізико-механічного характеру (механічні властивості металу поверхневих шарів, мікроструктура поверхневого шару, яка характеризується низькою чутливістю до концентрації напружень) є значним резервом забезпечення надійності відновлюваних деталей. Багатоваріантність задач, які вирішуються при дослідженні процесів формоутворення шару, нанесеного електроконтактним наварюванням стрічками, передбачає доцільність використання математичних моделей різного рівня складності, які забезпечують у кожному конкретному випадку одержання достатніх обсягів інформації.

У зв'язку з цим проведення комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, направлених на забезпечення зносостійкості та якості привареного металу, економії матеріальних ресурсів на основі ефективних технологічних рекомендацій, являє собою актуальну задачу, яка має для підприємств промислового комплексу України важливе наукове та практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких представлені в дисертаційній роботі, виконані у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського «Дослідження впливу зварювальних теплових, термомеханічних, статистичних процесів на структуру, технологічну міцність, якість металевих і композиційних матеріалів при зварюванні та конструкцій на їх основі» (номер державної реєстрації 0116u006106), а також держбюджетних науково-дослідних робіт «Обґрунтування напрямків підвищення надійності і довговічності вантажопідйомного, транспортуючого, будівельного і гірського устаткування на стадії проектування» (номер державної реєстрації 0112U006712), «Удосконалення конструкції та технологічної підготовки виробництва підйомно-транспортних будівельних і гірничих машин» (номер державної реєстрації 0115U004732) та у рамках конкурсних проектів з найважливіших напрямків науки і технологій, що фінансуються МОН України

«Визначення механізмів та створення теорії електроімпульсної консолідації нових порошкових матеріалів» у якості відповідального виконавця (номер державної реєстрації 0114U002537), «Удосконалення технології виробництва електродних матеріалів та процесу електроконтактного наплавлення» (номер державної реєстрації 0118U002849), а також у рамках комплексу науково-дослідних робіт, виконаних спільно з ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ).

Внесок автора як виконавця полягає в удосконаленні технології виготовлення електродних матеріалів та електроконтактного наварювання стрічками, в оптимізації технологічних параметрів, у розробленні технологічних рекомендацій.

Мета і задачі дослідження. Розвиток наукових засад процесу зносостійкого електроконтактного наварювання стрічками та розробка на цій основі технологічних прийомів з підвищення ефективності та якості відновлення виробів електроконтактним методом.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні основні *задачі*:

- експериментально дослідити мікроструктуру нанесеного електроконтактним методом шару, що характеризується низьким опором до мікропластичної деформації, як фактору накопичення втомних ушкоджень стосовно до деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження;
- провести розрахунок параметрів нагріву та вибір умов подальшого охолодження при термічній обробці привареного шару для створення структури, що характеризується низьким опором до мікропластичної деформації;
- експериментально дослідити вплив попередньої хіміко-термічної обробки електродних стрічок на фізико-механічні характеристики покриття, нанесеного електроконтактним наварюванням;
- провести теоретичний аналіз та розробку методики розрахунку енерго-силових параметрів формування покриттів різного функціонального призначення;
- розробити програмні засоби з автоматизованого проектування технології та вибору параметрів електроконтактного наварювання на базі математичного моделювання процесу.

Об'єкт дослідження. Нанесення функціональних шарів електроконтактним методом.

Предмет дослідження. Закономірності формування функціонального шару в термодеоформаційному осередку з визначенням умов і способів регульованого впливу на його формоутворення при електроконтактному наварюванні; матеріали, технологія для реалізації електроконтактного наварювання.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено основні положення теорії зварювальних процесів, пластичності та теплопровідності суцільного середовища, а також метод кінцевих елементів, реалізований у спеціальних програмних комплексах. Експериментальні дослідження виконано на вимірювальних та моделюючих установках у лабораторних, а натурні випробування – у промислових умовах; містять методи вимірювання зварювально-технологічних, фізико-механічних характеристик, а

саме дослідження мікропластичної деформації наварених зразків, кількісний металографічний аналіз покриття, дослідження швидкості зростання втомних тріщин при циклічному навантаженні та втомної міцності наварених зразків, випробування на зносостійкість та напруження відколу навареного шару, а також дослідження міцності зчеплення нанесеного покриття з поверхнею зразку. Математична обробка результатів дослідження виконувалась з використанням існуючого прикладного програмного забезпечення, методів статистичного аналізу, а також спеціально створеного пакету програм для оптимізації режимів електроконтактного наварювання. Достовірність одержаних результатів підтверджується їх використанням на промислових підприємствах України.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні основні результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень:

- набули подальшого розвитку уявлення про закономірності впливу коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до деталей, відновлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей, урахування яких дозволило знизити швидкість зростання втомної тріщини на 15,8-17,3% та підвищити втомну міцність на 17-20% за рахунок корегування кількісного співвідношення структурних складових у привареному шарі та їх розмірів;

- набув подальшого розвитку розрахунок параметрів індукційного нагріву з постійною питомою потужністю стосовно до відновлюваного поверхневого шару циліндричних деталей діаметром 50-120 мм, який є перехідним між наскрізним та гартівним нагрівом та забезпечує проведення нормалізації поверхневого шару при заданому розподілі температур у діапазоні 880...750°C по глибині прогріву з необхідною швидкістю нагріву не більше 50°C/c;

- вперше встановлено, що введення до теплоізолюючої сипучої суміші на основі сріблястого графіту добавок шаруватих з'єднань графіту дозволяє збільшити вміст надлишкового фериту у привареному шарі на 4,7% за рахунок підвищення ефекту термоізоляції відновлених деталей з наближенням до умов обробки у печі;

- вперше встановлено, що попереднє багатокomпонентне насичення сталевих стрічки В, Ті, АІ забезпечує зносостійкість привареного шару, яка може бути порівняна зі зносостійкістю борированного шару, при одночасному підвищенні напруження відколу у 2,5 рази;

- на основі чисельного рекурентного вирішення кінцево-різнецевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму шару, що приварюється, вперше розроблено математичну модель формування покриття, особливістю якої є урахування поточного розподілу термічних властивостей та геометричних параметрів вздовж термодформаційного осередку в процесі електроконтактного наварювання. З використанням даної моделі сформульовано та вирішено задачу з автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного нанесення покриттів;

- вперше на основі кінцево-різнецевої та кінцево-елементної моделі встановлено, що при створенні кінематичної асиметрії процесу

електроконтактного наварювання з величиною коефіцієнту $K_v=1,015$ міцність зчеплення відновлених зразків збільшується на 24,3-26,8%.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки:

- технологія відновлення циліндричних деталей, що включає термообробку привареного шару струмами високої частоти на задану глибину та охолодження у теплоізолюючій суміші;

- технологія комбінованого відновлення поверхонь деталей з попередньою хіміко-термічною обробкою електродного матеріалу, що забезпечує створення градієнтного розподілу властивостей по перетину привареного шару (Пат. 116099 Україна);

- методики проектування технологічного процесу електроконтактного наварювання, розроблені на основі встановлених закономірностей теплового та силового режимів;

- алгоритм автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного нанесення покриттів, що дозволяє визначити оптимальні режими наварювання з урахуванням заданих параметрів електродних матеріалів;

- спосіб підвищення міцності зчеплення привареного шару з поверхнею деталі за рахунок створення кінематичної асиметрії при електроконтактному наварюванні (Пат. 118044 Україна та 116024 Україна);

- програмні засоби, які дозволяють визначити енергосилові характеристики процесу формоутворення покриття при електроконтактному наварюванні з урахуванням поточного розподілу теплових та геометричних показників матеріалу у термодформаційному осередку;

- інформаційне та програмне забезпечення, база даних, необхідні для створення гібридної нейронної системи керування процесом електроконтактного наварювання.

Окремі положення дисертації впроваджені у навчальний процес.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора в дисертаційній роботі полягає в обґрунтуванні загальної її концепції; постановці мети, визначенні завдань і самостійному виборі наукових підходів до їх вирішення, формуванні програми досліджень, розроблені математичних моделей, підготовці експериментів, формулюванні закономірностей, аналізі і узагальненні результатів теоретичних і експериментальних досліджень. При підготовці публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним.

Робота є результатом самостійних досліджень Бережної О.В.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на IX Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2011); 3-й міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (м. Донецьк, 2011); X Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку»

(м. Краматорськ, 2012); 4-й міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (м. Донецьк, 2012); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (м. Вологда, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы в машиностроении» (м. Новосибірськ, 2014); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2015); V Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2015); International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering (TEMPUS) (Nitra, 2016); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки» (м. Дніпропетровськ, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «Университетская наука – 2016» (м. Маріуполь, 2016); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы в машиностроении» (м. Новосибірськ, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2017); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» (м. Дніпро, 2017); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено у 60 науково-технічних роботах, у тому числі 2 монографії, 27 статей у фахових наукових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 22 публікації в інших наукових виданнях та збірниках конференцій, з яких 5 входять до наукометричних баз даних. Новизна розробок підтверджена 9 патентами України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 395 сторінок, у тому числі 270 сторінок машинописного тексту, 133 рисунки і 41 таблицю, перелік використаних джерел із 370 найменувань, додатки на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і намічено шляхи її досягнення, показано зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Наведено характеристику наукової новизни та

практичного значення одержаних результатів, а також їх апробації та впровадження.

Розділ 1. Сучасний стан питання

Проведено аналіз стану питання у галузі технологій, обладнання та матеріалів процесів відновлення зношених поверхонь. На основі проведеного аналізу встановлено напрямки подальшого удосконалення процесів виготовлення електродних матеріалів та електроконтактного наварювання зношених деталей. Сучасне машинобудування пред'являє особливі вимоги до підвищення рівня надійності та збільшення ресурсу відновлених деталей. При проектуванні відновлювальної операції з використанням розрахункових методів призначення технологічних умов нарощування поверхневого шару закладаються рішення, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості: міцність зчеплення нанесеного шару з основою, зносостійкість та втомна міцність. Міцність зчеплення розглядають як критерій, що відповідає вимогам, які пред'являються до відновлення деталей машин. Зносостійкість поверхневих шарів деталі визначає тільки її міжремонтний термін служби, оскільки зношений метал може бути відновлений методами реновації. Кінцева мета реновації – одержання виробів у вигляді закінчених форм, розмірів, дизайну та заданих функціональних властивостей із забезпеченням їх взаємозамінності та збереженням робочих характеристик відновлюваних деталей.

В якості вихідних передумов теоретичних досліджень використано наукові положення, які містяться в трудах Б.Є. Патона, В.І. Махненка, В.А. Вінокурова, Н.Н. Рикаліна, І.І. Фрумїна, І.Р. Пацкевича та інших визнаних вітчизняних і закордонних спеціалістів у галузі теорії зварювальних процесів, а також результати робіт Е.С. Каракозова, Ю.В. Кліменка, А.В. Поляченка, В.І. Черноїванова, В.А. Наливкіна, Н.Н. Дорожкіна, В.Ф. Квасницького, Г.К. Харченка, С.І. Кучука-Яценка та інших провідних спеціалістів у галузі отримання нероз'ємних з'єднань електроконтактними методами.

Порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик альтернативних варіантів реновації конструктивних розмірів робочих поверхонь деталей механізмів та машин свідчить про те, що у сучасних умовах дефіциту матеріальних та енергетичних ресурсів їх відновлення та зміцнення електроконтактними методами з використанням в якості електродних матеріалів стрічок є високоефективним ресурсозберігаючим технологічним прийомом. Сучасні електродні матеріали, що застосовуються для електроконтактного наварювання, у тій чи іншій мірі задовольняють вимогам регламентації надійності та довговічності, забезпечують дотримання принципів взаємозамінності та економічності.

Регламентування комплексу показників фізико-механічного характеру (механічні властивості металу поверхневих шарів, мікроструктура, залишкові напруження з утворенням сприятливого їх розподілу у поверхневому шарі) є значним резервом забезпечення надійності відновлених деталей. Внаслідок багатоваріантності можливих технічних рішень застосування всебічного та комплексного підходу є необхідним не тільки у рамках всього технологічного ланцюга, а і у рамках кожної окремої його складової, оскільки тільки урахування

всіх вихідних та результуючих параметрів може надати узагальнену оцінку ефективності конкретних технологічних рішень та розроблених на їх основі рекомендацій для такої складноорганізованої системи як комплексна технологія відновлення поверхневого шару.

В результаті проведеного аналізу існуючих досліджень у галузі відновлення зношених деталей встановлено необхідність вирішення задач з підвищення якості та зниження собівартості при підвищенні службових характеристик відновлених деталей, що, в свою чергу, вимагає проведення всебічних, комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, направлених на розробку рішень з удосконалення конкретних технологічних заходів.

Розділ 2. Дослідження мікропластичної деформації структур металу, нанесеного електроконтактним методом

Досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наварених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей, у зв'язку з різною чутливістю привареного металу до концентрації напружень. Дослідження мікропластичності навареного металу проводили на зразках при деформації розтягування. Об'єктом дослідження служили зразки зі сталей марок 25, 40 і 40Х, які піддавали електроконтактному наварюванню стрічкою товщиною 0,5мм на режимах, що варіюються в інтервалах: $I_n=6,0...6,5$ кА, $P=1,25...1,5$ кН, $t_{\text{имп}}=0,04...0,06$ с. Матеріал стрічок обирали ідентичним маркам сталі зразків. Наварені зразки піддавали термічній обробці за різними режимами з метою зміни структури поверхневого шару (табл.1).

Таблиця 1 – Режими термічної обробки наварених зразків для випробування на мікропластичність

Марка сталі	Група	Режим початкової термообробки			Режим відпуску		
		$T, ^\circ\text{C}$	Час витримки, год	Охолоджуюче середовище	$T, ^\circ\text{C}$	Час витримки, год	Охолоджуюче середовище
25	A	880-900	1	повітря	620	2,5	разом з піччю
40	B	860-880	1	з піччю	620	1,5	разом з піччю
40X	I	850-870	1	з піччю	640-660	1,5	разом з піччю
40X	II	850-870	1	масло	640-660	1,5	разом з піччю
40X	III	850-870	1	масло	540-560	1,5	разом з піччю

В результаті обробки за вказаними режимами одержано 5 груп наварених зразків для дослідження мікропластичності та однорідності вглиб привареного шару та зони термічного впливу. Для дослідження впливу структури на зміну мікропластичності вздовж поздовжньої осі зразку за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3 наносили ряд реперних точок пірамідою під навантаженням 20г. Відбитки наносили через кожні 0,04-0,05 мм, тобто через відстані, що сумірні з розміром зерна навареного металу досліджуваних зразків. Відстань між відбитками слугувала базою для розрахунку відносних деформацій під дією прикладених навантажень.

Аналіз мікроструктури проводили за допомогою металографічного мікроскопу МІМ 8 з цифровою фотонасадкою, що дозволило визначити мінімальні навантаження та, відповідно, напруження, що викликають видимі

акти пластичної деформації. Після кожного чергового навантаження проводили заміри 150-160 базових відстаней (відстані між відбитками реперних точок). За даними замірів відстаней між відбитками визначали зміну цієї відстані при збільшенні напруження у результаті прикладеного поточного навантаження. Більша мікропластична деформація наварених зразків групи А порівняно з навареними зразками, що пройшли термообробку за режимами II і III та нормалізацію (рис. 1), свідчить про структурний стан, що обумовлює підвищення в'язкості руйнування.

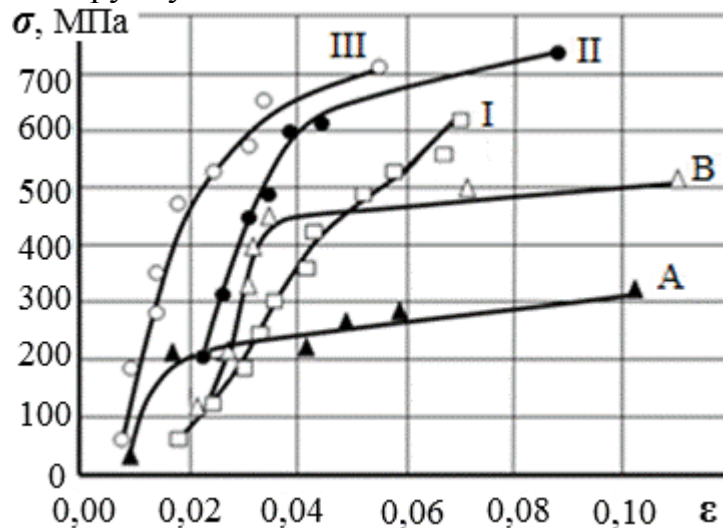


Рисунок 1 – Експериментальні дані зміни величини мікропластичної деформації ϵ у наварених зразках після термічної обробки (згідно з табл.1) при збільшенні напруження σ

Незважаючи на те, що при дослідженні мікропластичної деформації вже при самих низьких напруженнях виникали залишкові мікродеформації, під мікроскопом лінії ковзання виявлялися при достатньо високих напруженнях (рис.2).

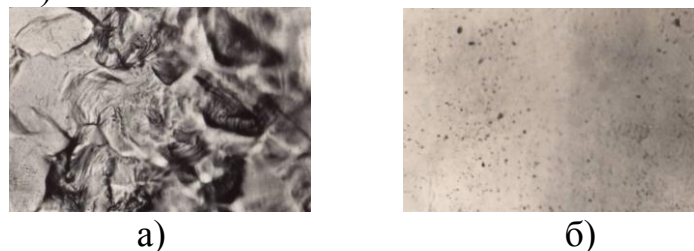


Рисунок 2 – Структура поверхні наварених зразків зі сталі 40X після відпалу (група I) при максимальному напруженні 602 МПа (а) та після термообробки за режимом II (група II) при мінімальному напруженні 59,804 МПа (б) ($\times 500$)

Характерним є те, що ці напруження підвищуються зі збільшенням об'ємного вмісту перліту та разом зі зниженням температури відпуску при термообробці за режимом III. В наварених зразках групи А лінії ковзання, що утворюються, є паралельними. З утворенням великої кількості перліту змінюється і форма ліній ковзання, вони набувають вигнутого характеру. Це має місце тим більшою мірою, чим більше об'ємний вміст перліту. Лінії ковзання у сорбітоподібних структурах (наварені зразки групи II) вигнуті, з'являються

поступово у широкому діапазоні напружень. При високих напруженнях, зростає і кількість об'ємів з високою щільністю ліній.

Найбільш високою схильністю до мікропластичної деформації характеризуються наварені зразки групи А, основна структурна складова яких – ферит. У вказаних зразках найбільш легко виникає деформація. Зі збільшенням кількості цементитної складової (перліту) зростає опір зразків мікропластичній деформації. Для наварених зразків зі сталі 25 необхідні найменші напруження для виникнення мікропластичної деформації – 30,5 МПа. В наварених зразках з більшим вмістом у структурі цементиту ці напруження вищі. Найбільш високі напруження мають місце у зразках, які після наварювання піддавались термічній обробці з утворенням сорбіту та трооститу відпуску. Наприклад, для наварених зразків зі сталі 40Х із сорбітом відпуску (II група) мінімальні напруження складають 59,804 МПа (рис. 2, б), а у тих самих зразках з трооститом відпуску (III група) – 201,16 МПа.

Морфологію поверхні навареного шару відносно номінальної площини залежно від прикладеного навантаження досліджували за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що базується на методі пошарової мікроскопії та дозволяє одержувати топографічні рельєфи об'ємних об'єктів. Згідно з 3D профілем поверхні (рис.3), вже при мінімальних напруженнях помітна значна нерівномірність розподілу мікродеформацій по поверхні досліджуваного навареного зразку, який пройшов термічну обробку, що свідчить про підвищену схильність до концентрації напружень.

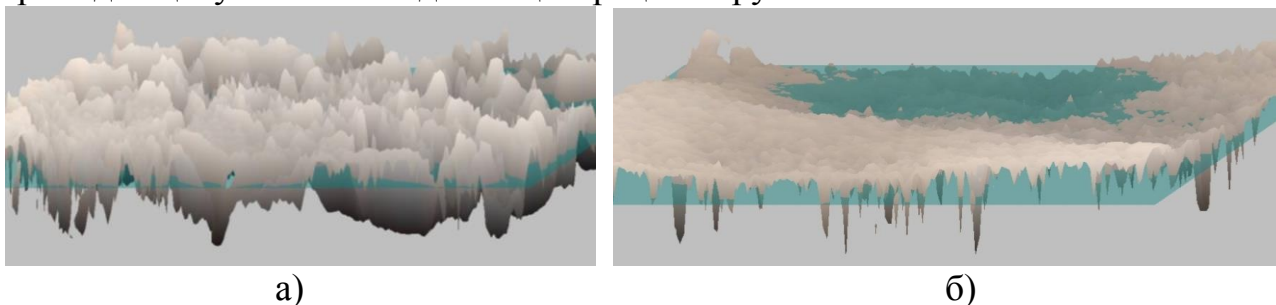


Рисунок 3 – 3D профілі поверхонь наварених зразків зі сталі 40Х після відпалу (група I) при максимальному напруженні 602 МПа (а) та після термообробки за режимом II (група II) при мінімальному напруженні 59,804 МПа (б)

Збільшення кількості цементитної складової у поверхневому шарі привареного металу приводить до утворення одиничних піків різної величини, хаотично розосереджених вздовж поверхні, тобто до утворення концентраторів напружень по всій поверхні. При максимальних напруженнях морфологія поверхні свідчить про зростання габаритів нерівностей поверхні зі значним збільшенням окремих піків та частоти нерівностей (рис. 3, а).

Так як тісний взаємозв'язок може бути встановлений між мікропластичною деформацією та модулем пластичності, то, відповідно, чим більший модуль пластичності, тим вища чутливість матеріалу до концентрації напружень. Модуль пластичності (коефіцієнт зміцнення) визначали з використанням методів моделювання у програмному середовищі STATISTICA StatSoft 10 (рис.4).

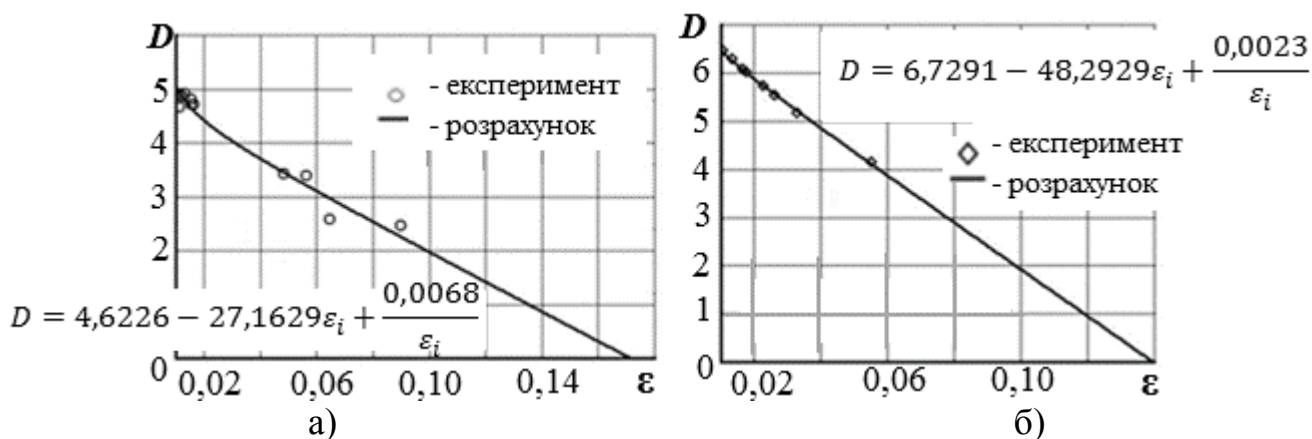


Рисунок 4 – Змінення коефіцієнту зміцнення D залежно від середньої сумарної мікропластичної деформації ε наварених зразків зі сталі 25 у нормалізованому стані (група А) (а) та наварених зразків зі сталі 40Х після термообробки за режимом II (група II) (б)

Показано, що величини коефіцієнту зміцнення при мікропластичній деформації не однакові для різних структурних станів та ступеню деформації. Зразки групи А характеризуються найменшим коефіцієнтом зміцнення з усіх досліджених (рис. 4, а), більший коефіцієнт зміцнення мають наварені зразки у стані після термообробки за режимом II (рис. 4, б). Зі збільшенням ступеню деформації коефіцієнт зміцнення знижується в усіх досліджуваних структурних станах, що вказує на залежність процесу пластичного течіння від ступеню мікродоформації.

Проведені дослідження схильності привареного металу у різних структурних станах до мікропластичної деформації дозволили виявити структуру привареного металу, яка є найменш чутливою до концентрації напружень: наявність у структурі привареного шару вільного фериту знижує інтенсивність накопичення дислокацій. Така структура відрізняється меншою кількістю перешкод для ковзання, а стартові напруження у зразках з феритною структурою складають 30,5 МПа.

Наварені зразки зі структурою сорбіту та трооститу характеризуються розвинутою міжзеренною поверхнею, що сприяє збільшенню кількості перешкод для ковзання та обумовлює високі стартові напруження для початку руху дислокацій (для наварених зразків, що пройшли термообробку за режимом II – 59 МПа; для наварених зразків, що пройшли термообробку за режимом III – 201 МПа). Експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до зразків, наварених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей з наступною термічною обробкою.

Розділ 3. Розробка комбінованої технології відновлення деталей типу «вал», які працюють в умовах циклічного навантаження

Проведено вибір режиму індукційного нагріву при нормалізації відновленого поверхневого шару циліндричних деталей діаметром $D=50\ldots120$ мм стосовно до конструкційних сталей з наступними параметрами: швидкість зростання поверхневої температури не більше 50 °C/c з кінцевим

значенням $T_0 = 880^\circ\text{C}$ та прогрів по глибині $x_{k1} = (3...5)$ мм не повинен відрізнятися більше, ніж на 50°C . Режим продовжується до закінчення нагріву, при цьому глибина прогрітого шару x_k більша за гарячу глибину проникнення струму Δ_k , а глибина активного шару складає $\xi = 0,55\Delta_k \leq 0,2D$, де $D = 2R$. Глибина прогрітого шару x_k у припущенні лінійної залежності від x змінення температури в межах від 880 до 750°C та при урахуванні величин x_{k1} і T_{k1} складає $x_k = x_{k1}(T_0 - T_k) / (T_0 - T_{k1}) = (8...13) \cdot 10^{-3}$ м. Значення температури T на відстані x від поверхні може бути отримане з рішення рівняння теплопровідності з правою частиною, яка визначається відносною глибиною активного шару α , відносною координатою β , критерієм Фур'є Fo , питомою потужністю p_0 та коефіцієнтом теплопровідності λ :

$$T(x) = 2 \cdot [Fo + S(\alpha, \beta, Fo)] \cdot \left[\frac{p_0 R}{\lambda} \right]. \quad (1)$$

Відповідно, для області всередині активного шару $\xi(\beta > \alpha)$ при $Fo > 0,2$ вирази для $S(\alpha, \beta, Fo)$ не залежать від Fo та приймають вигляд:

$$S(\alpha, \beta, Fo) \approx S(\alpha, \beta) = -\left(2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta\right) \cdot \left(\frac{\alpha^2}{8(1 - \alpha^2)}\right). \quad (2)$$

Для області по-за активним шаром $\xi(\beta < \alpha)$ при $Fo < 0,2$:

$$S(\alpha, \beta, Fo) \approx S(\alpha, \beta) = \left(\frac{\beta^2}{4}\right) + \left(\frac{\alpha^2}{8}\right) + \left(\frac{\alpha^2 \ln \alpha}{2(1 - \alpha^2)}\right). \quad (3)$$

На межі активного шару, тобто при $\beta = \alpha$, обидва вирази дають однаковий результат, а при $Fo < 0,2$ значення допоміжної функції $S(\alpha, \beta, Fo)$ знаходять за табличними даними. Значення температури T_0 на поверхні деталі ($x = 0$, $\beta = 1$) та T_k на її глибині ($x = x_k$, $\beta = \beta_k$) складатимуть:

$$T_0 = 2 \frac{p_0 R}{\lambda} [Fo + S(\alpha, 1, Fo)]; \quad T_k = 2 \frac{p_0 R}{\lambda} [Fo + S(\alpha, \beta_k, Fo)]. \quad (4)$$

Необхідна питома потужність визначається за виразом:

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R[Fo + S(\alpha, 1, Fo)]}, \quad (5)$$

а час нагріву:

$$t_k = \frac{R^2}{a} Fo = \frac{R^2}{a} \cdot S(\alpha, 1) - \left(\frac{T_0}{T_k} S(\alpha, \beta_k)\right) \left/ \left(\frac{T_0}{T_k} - 1\right) \right. \quad (6)$$

Приведені співвідношення дозволяють для обраного режиму за заданим значенням $x_k = \Delta_k$, $T_0/T_k = 880/750 = 1,173$ та R розрахувати питому потужність p_0 , час нагріву t_k , частоту f , швидкість зростання поверхневої температури та її розподіл по перетину деталі. Розподіл температури у поверхневому шарі на етапі попереднього прогріву та наприкінці нагріву представлено графічною залежністю (рис.5). Встановлено, що задана умова зміни температури виконується в діапазоні від поверхні деталі до $0,8x_k$ та зростає до $60...65^\circ\text{C}$ у межах $(0,8...1,0)x_k$. Показано, що в обраному діапазоні діаметрів деталей від 50 до 120 мм залежності $T(x)$ знаходяться між кривими 2 та 4 на перехідному етапі та між кривими 1 і 3 для скінчення прогріву.

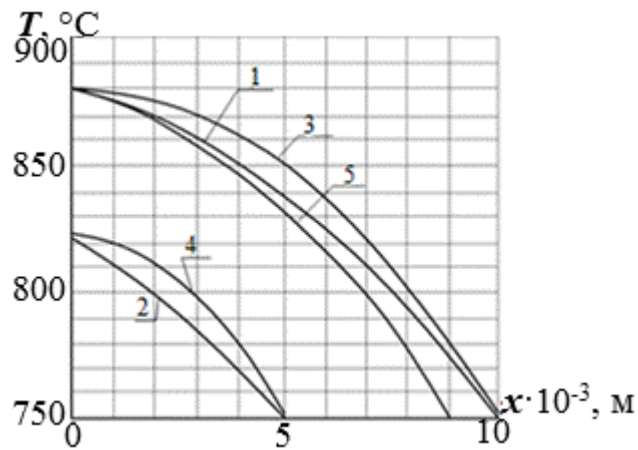


Рисунок 5 – Розподіл температури в поверхневому шарі при глибині прогріву 10 мм для діаметрів деталі: 1 – 120 мм і 3 – 50 мм; та на перехідному етапі: 2 – 120 мм і 4 – 50 мм; а також 5 – розподіл температури для діаметра 120мм при глибині 9 мм.

Встановлено, що розраховані значення питомої потужності p_0 та часу нагріву t_k відрізняються від відомих значень цих параметрів при наскрізному нагріві та нагріві під гартування, отже пропонується нагрів є перехідним між відомими режимами нагріву циліндричних деталей. При цьому даний нагрів забезпечує необхідне значення зростання поверхньої температури та близьке до заданого її розподілення вглиб прогрітого шару. Розраховані значення параметрів індукційного нагріву представлено у вигляді графічної залежності (рис.6).

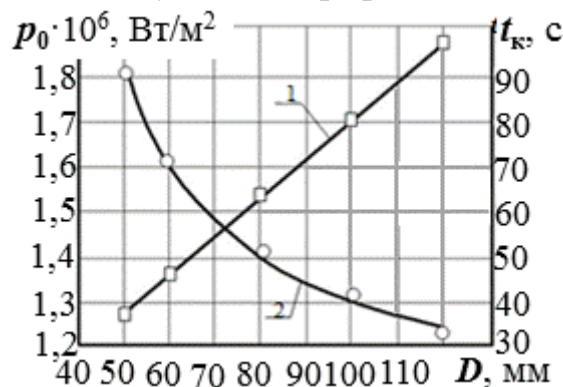


Рисунок 6 – Залежності часу нагріву (1) та питомої потужності (2) від діаметру відновленої деталі

Розроблено склад теплоізолюючої суміші: 8-12% шарувате з'єднання графіту з коефіцієнтом терморозширення 150-170 см³/г при температурі 200-250°C, решта – графіт ГЛ1. Її застосування знижує енерговитрати при термообробці наварених зразків після ТВЧ, підвищуючи ефект теплоізоляції з наближенням до умов обробки в печі.

Встановлено, що уповільнене охолодження у теплоізолюючій суміші наварених валів після локального нагріву ТВЧ забезпечує зниження швидкості охолодження з температури аустенізації до початку перлітного перетворення.

Застосування такої комбінованої технології відновлення деталей сприяє підвищенню середнього вмісту надлишкового фериту на 4,7% та забезпечує збільшення розміру зерна у середньому на 11мкм. При цьому загальна концентрація надлишкового фериту складає 33,5899% при мінімальній

концентрації 28,4167% і максимальній – 37,7756%. В той же час середній вміст надлишкового фериту при охолодженні на повітрі в середньому на 4,7% нижче, порівняно з охолодженням наварених зразків у теплоізолюючій суміші. Таким чином, загальна концентрація надлишкового фериту у навареному зразку після ТВЧ та охолодженні на повітрі в 1,12 рази менша і складає 30,0077% при мінімальній концентрації 28,5952% і максимальній – 31,4373%. Така тенденція зберігається при аналізі всіх наварених зразків (рис. 7).

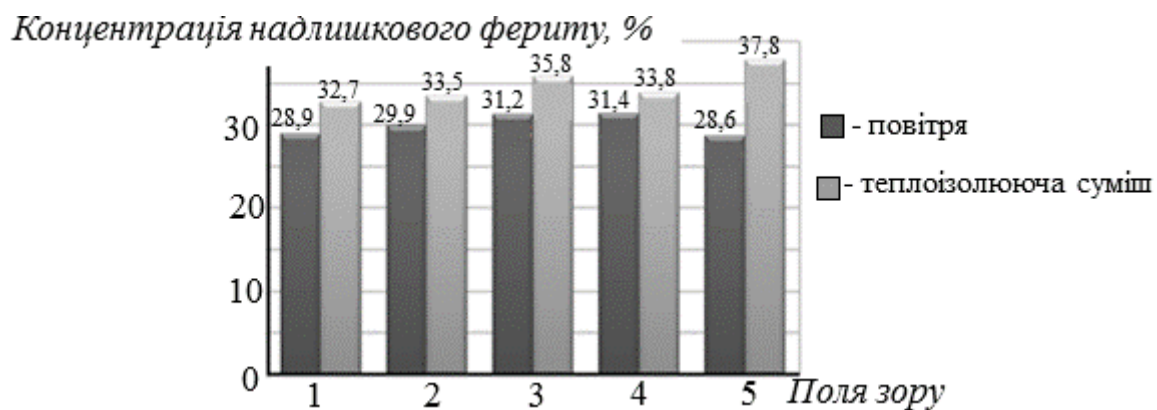


Рисунок 7 – Розподіл кількості надлишкового фериту у наварених зразках зі сталі 45 після охолодження на повітрі та при охолодженні у теплоізолюючій суміші

Уповільнене охолодження при витримці у теплоізолюючій суміші також приводить до збільшення розмірів зерен. Таке змінення розмірів зерен викликане тим, що дифузійне перетворення аустеніту в феритно-цементитну суміш при охолодженні у теплоізолюючій суміші протікає більш повільно та при більш високих температурах. Згідно з результатами досліджень, середній розмір зерна, який одержано при уповільненому охолодженні, на 11 мкм більше порівняно із зерном, отриманим при охолодженні на повітрі.

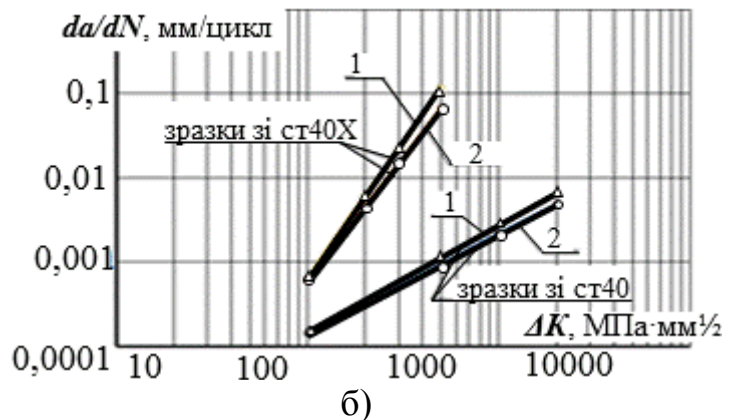
Встановлено, що при різних варіаціях за хімічним складом привареного та основного металу вибір режимів комбінованої обробки слід здійснювати виходячи зі схильності матеріалів до концентрації напружень.

При виборі раціональної технології відновлення та зміцнення зношених виробів, велике значення мають не тільки характеристики стандартних механічних властивостей і межа витривалості, але й опір розвитку тріщин. Швидкість розповсюдження тріщин втоми досліджували на модельних зразках зі сталі 40 і 40Х, які імітували структурний стан поверхневого шару з визначеним вмістом пластичних фаз, регульованим комбінованою термічною обробкою.

Дослідження проводили на гідравлічній машині МУП-50 з пульсатором, який забезпечує максимальне навантаження в 0,25 МН. Схема навантаження – зосереджене навантаження, утворююче деформацію вигину. Після з'явлення тріщини її довжину вимірювали через рівні проміжки часу (5...10 хв.) за допомогою мікроскопу з точністю до 0,01 мм. Після збільшення тріщини навантаження зменшували. Випробування продовжували до одержання тріщини довжиною 3,0...4,0 мм (рис.8, а).



а)



б)

Рисунок 8 – Загальний вид тріщини в модельному зразку (а) та залежність швидкості зростання втомних тріщин від зміни коефіцієнту інтенсивності напружень при охолодженні зразків на повітрі (1) та у теплоізолюючій суміші (2) (б)

За експериментальними даними визначали прирощення тріщини da за дане число циклів dN . За результатами випробувань встановлювали залежність швидкості зростання тріщин da/dN від зміни інтенсивності напруження за цикл навантаження ΔK . Встановлено, що охолодження зразків у теплоізолюючій суміші дозволяє знизити швидкість зростання тріщин як у зразках зі сталі 40, так і у зразках зі сталі 40Х (рис.8, б).

Встановлено, що для деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, структура, одержана в результаті комбінованої обробки, є найменш чутливою до концентрації напружень. Результати експериментальних досліджень свідчать про зниження швидкості зростання втомної тріщини на 15,8-17,3% та зростання втомної міцності (випробування на машині МУІ-6000) наварених зразків на 17% зі 198МПа до 232 МПа.

Розділ 4. Дослідження впливу попередньої обробки електродних стрічок на структуру та зносостійкість привареного шару

Методом хіміко-термічної обробки розроблені нові стрічки з градієнтним розподілом властивостей по перетину, кількісні показники фізико-механічних та експлуатаційних покриттів з яких дозволяють підвищити довговічність та надійність відновлених деталей. На поверхні металевої стрічки з низьковуглецевої сталі для електроконтактного наварювання створювали зносостійкий шар шляхом попередньої хіміко-термічної обробки електродної стрічки, причому на поверхні деталі перед електроконтактним наварюванням закріплювали стрічку у контакті стороною, яка не піддавалась хіміко-термічній обробці.

Попередній хіміко-термічній обробці у порошкових сумішах піддавали низьковуглецеві сталеві стрічки 08кп товщиною 0,5 мм за рекомендованою для комплексного насичування технологією: електродні стрічки з порошковими сумішами зі змінним вмістом компонентів поміщували у контейнери з алітованої сталі, які розташовували у печі з витримкою протягом 5 годин при температурі 1000°C.

Електроконтактне наварювання підготовлених електродних стрічок проводили на наступних режимах: зусилля – $P = 1,5...2$ кН; струм наварювання – $I_H = 6,0...7,0$ кА; тривалість імпульсу струму – $t_{\text{имп}} = 0,06...0,07$ с. Це дозволило

одержати нанесений шар з макророзподілом структур по функціональним зонам: феритний прошарок між зносостійким шаром та поверхнею деталі сприяє зниженню імовірності утворення тріщин, пор та інших дефектів в зоні приварювання.

Дослідження зносостійкості нанесеного шару проводили по критерію відносного зношення зразків за втратою ваги за визначений час. Мікротвердість наварених зразків оцінювали за напруженням відколу дифузійного шару у нанесеному покритті під дією алмазної піраміди. З метою дослідження впливу вмісту компонентів B_4C (x), $FeTi$ (y) і Al_2O_3 (z) у складі комплексної насичувальної суміші для обробки електродних стрічок на зносостійкість (I_t) та напруження відколу (σ) навареної поверхні проведено оптимізацію складу з використанням засобів програмного продукту STATISTICA StatSoft 10:

$$I_t = 7,8188952523906 \cdot x - 5,5166422532403 \cdot y + 5,293515559245 \cdot z + 10,878044705202 \cdot x \cdot y - 3,2906931172267 \cdot x \cdot z - 3,5039514742558 \cdot y \cdot z; \quad (7)$$

$$\sigma = -210,33116893869 \cdot x + 1504,2621066421 \cdot y + 368,46206158809 \cdot z - 610,72766169457 \cdot x \cdot y + 562,19762217212 \cdot x \cdot z + 195,61840846118 \cdot y \cdot z. \quad (8)$$

Запропоновані регресійні моделі є адекватними, оскільки різниця між розрахованими та експериментальними даними не перевищує 9% для випадку дослідження зносостійкості, а для напруження відколу – 13%. На основі одержаних регресійних моделей побудовано відповідні графічні залежності (рис.9).

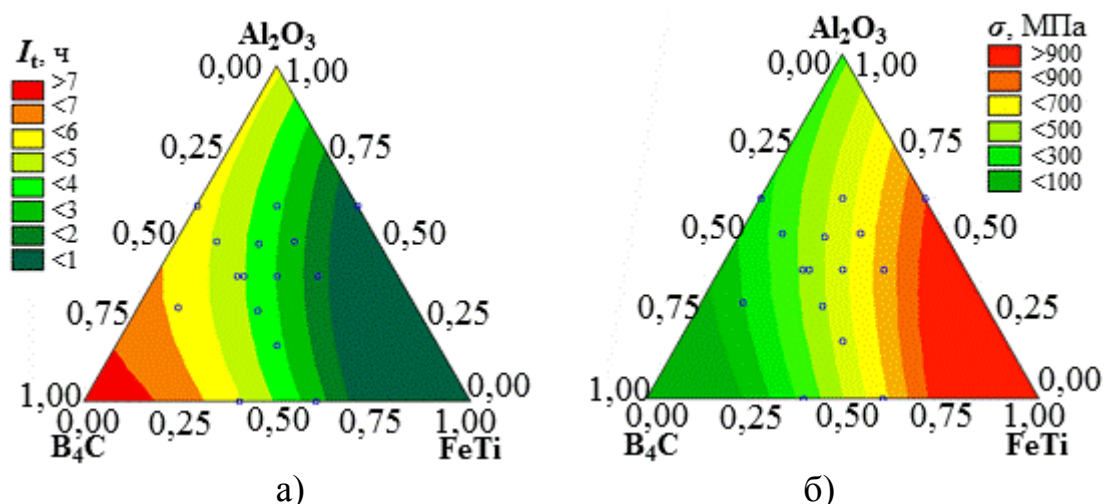


Рисунок 9 – Результати регресійного аналізу впливу складу насичувальної суміші для попередньої хіміко-термічної обробки електродного матеріалу на зносостійкість (а) і напруження відколу (б) нанесеного шару

Встановлено, що високими експлуатаційними показниками в умовах контактного та абразивного тертя відрізняється шар, наварений сталеву стрічкою, яка пройшла попереднє багатокомпонентне насичення у суміші B_4C - $FeTi$ - Al_2O_3 наступного складу: 20-30% B_4C ; 30-40% $FeTi$; 20-40% Al_2O_3 ; 7% Na_3AlF_6 . Запропонована технологія підготовки електродного матеріалу дозволяє забезпечити рівномірний розподіл твердої складової (боридів заліза з

$H_{100}=15300\text{МПа}$) у пластичній матриці (твердий розчин феротитану з $H_{100}=2060\text{МПа}$) з м'яким феритним прошарком ($H_{100}=1210\text{МПа}$) (рис.10).

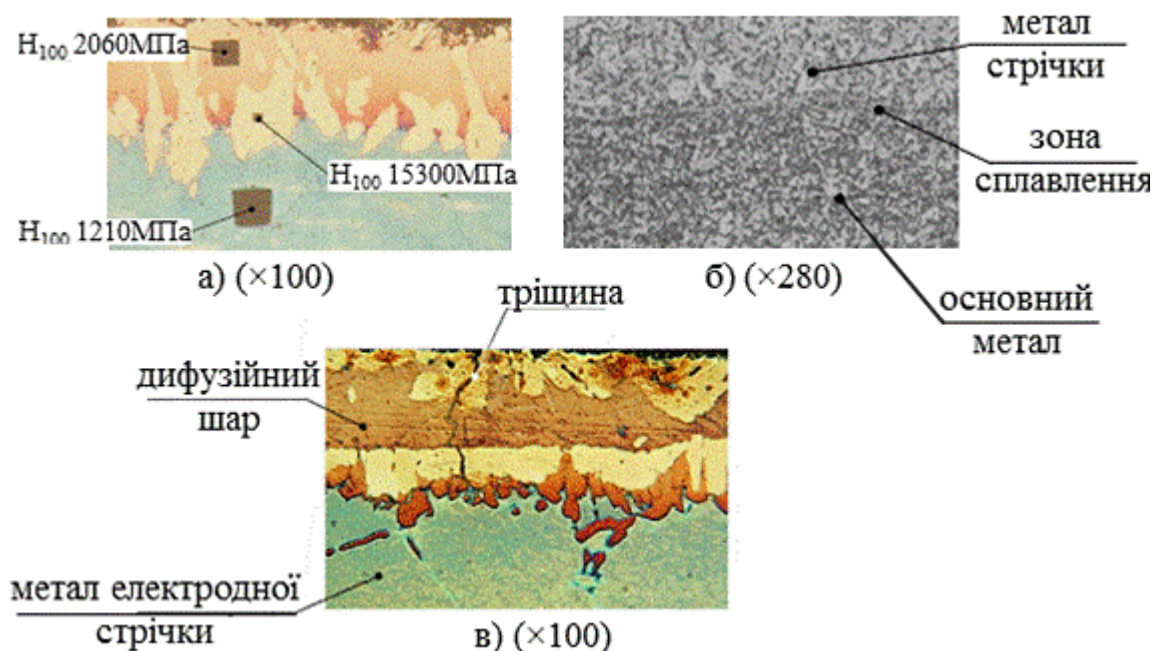


Рисунок 10 – Мікроструктура нанесеного шару після теплового (а, в) та після хімічного (б) травлення

Після електроконтактного наварювання підготовленим електродним матеріалом структура нанесеного шару складається з двох зон, а саме: зони твердого розчину, який після теплового травлення має рівномірний коричневий колір по всій товщині, та зони боридів Fe_2B (рис.10, а).

Застосування при електроконтактному наварюванні одержаних електродних матеріалів з градієнтним розподілом властивостей забезпечує створення покриття з високими зносостійкими властивостями на його поверхні та збереженням пластичних властивостей у м'якій феритній складовій, що запобігає росту тріщин та їх розповсюдженню в основний метал при бездефектному приварюванні до металу деталі (рис. 10,б).

Експериментально встановлено, що застосування запропонованого електродного матеріалу при відновленні деталей електроконтактним методом дозволяє забезпечити утворення покриття, зносостійкість якого близька до зносостійкості боридного шару при одночасному підвищенні напруження відколу у 2,5 рази за рахунок рівномірного розподілу твердої складової.

Закріплення стрічки в зоні контакту з поверхнею деталі перед електроконтактним наварюванням стороною, яка не піддавалась хіміко-термічній обробці є необхідною умовою якісного з'єднання. Закріплення стрічки стороною, яка піддавалась хіміко-термічній обробці, приводить до практичної відсутності пластичної деформації присадного металу, що перешкоджає утворенню якісного з'єднання: не вдається виключити дефекти у вигляді внутрішніх та поверхневих тріщин (рис.10, в), раковин, пор, несплавлення, викришування привареного шару та ін.

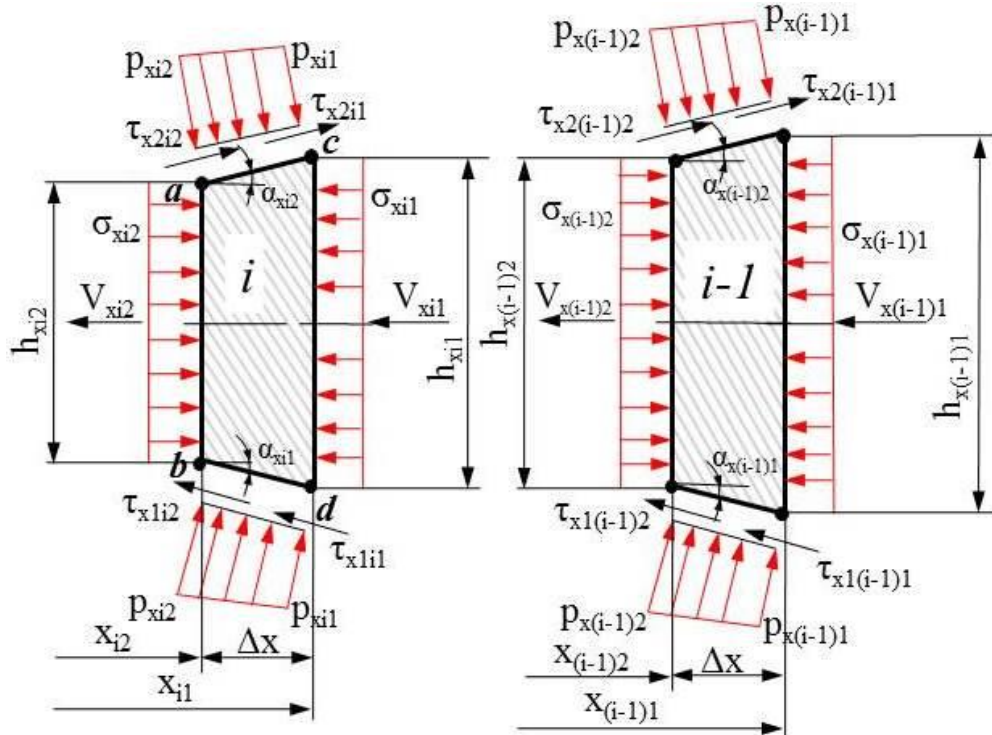


Рисунок 12 – Розрахункова схема виділених елементарних об'ємів

Під час розрахунку локальних характеристик напружено-деформованого стану в рамках зон пластичного змінення електродного матеріалу шляхом числового інтегрування виконували визначення зусилля P на ролику-електроді та моментів M_1 на деталі і M_2 на ролику-електроді залежно від значень нормальних контактних напружень p_{xi1} , p_{xi2} , поточного значення коефіцієнтів пластичного тертя μ_{x1i1} , μ_{x1i2} , μ_{x2i1} , μ_{x2i2} та ширини b ролику-електроду:

$$P = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} + p_{xi2}) \Delta x / 2 \right] b; \quad M_1 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} \mu_{x1i1} + p_{xi2} \mu_{x1i2}) \Delta x / 2 \right] b R_{b1}; \quad (12)$$

$$M_2 = \left[\sum_{i=1}^n (p_{xi1} \mu_{x2i1} + p_{xi2} \mu_{x2i2}) \Delta x / 2 \right] b R_{b2}. \quad (13)$$

Моделювання теплового стану електродного матеріалу в термодформаційному осередку при електроконтактному наварюванні проводили згідно з теорією теплопровідності. Рішення задачі визначення температури електродного матеріалу в термодформаційному осередку електродної стрічки в заданій точці у будь-який момент при електроконтактному наварюванні визначається швидкістю g та часом t нагріву, температурою довколишнього середовища T_0 , коефіцієнтом температуропровідності a , відстанню r від поверхні стрічки, заданою координатою y , значенням простих коренів μ_n та амплітуд A_n і має вигляд:

$$T_m(y, t) - T_0 = gt - \frac{g}{2a} \left[r^2 \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) - y^2 \right] + \frac{gr^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \left(\mu_n \frac{y}{r} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (14)$$

Знаючи розподіл температурних полів вздовж електродного матеріалу в термодформаційному осередку та значення координати точки x_i в обраному елементарному об'ємі, поточної товщини електродної стрічки h_{xi} , коефіцієнту теплопровідності λ і часу протікання імпульсу струму t_i , величина необхідної сили струму розраховується за формулою:

$$I = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\frac{T \pi^2 x_i h_{xi} \lambda c g}{r \delta t_i}}. \quad (15)$$

Представлена сукупність аналітичних описів склала повний алгоритм з числового одновимірного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання електродною стрічкою. Особливістю математичної моделі є коректне урахування розподілу теплових характеристик електродного матеріалу вздовж термодформаційного осередку, що відіграє важливу роль у формуванні з'єднання в процесі наварювання. Встановлено вплив величини коефіцієнту кінематичної асиметрії на зміну локальних енергосилових характеристик процесу (рис.13).

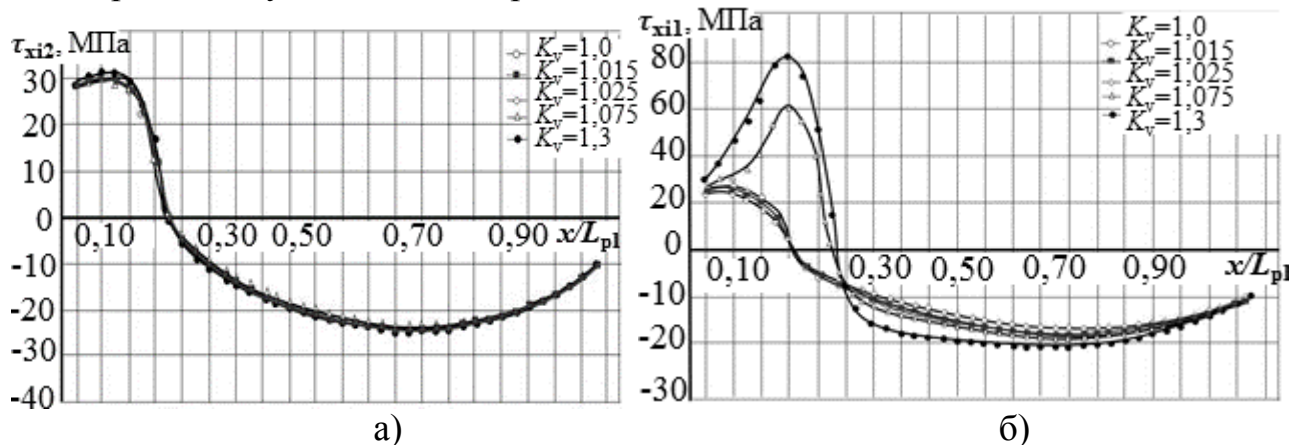


Рисунок 13 – Розраховані розподіли дотичних контактних напружень в зоні контакту електродної стрічки з ролик-електродом (а) та з поверхнею деталі (б) вздовж зони наварювання залежно від коефіцієнту швидкісної асиметрії (початкова товщина електродного матеріалу 0,5 мм)

Встановлено, що найбільш раціональним з точки зору якості формування покриття є створення в процесі електроконтактного наварювання швидкісної асиметрії, яка не перевищує значення $K_v = 1,015$. З використанням розроблених програмних засобів на основі представленої кінцево-різницевої математичної моделі було проведено розрахунок основних технологічних параметрів процесу (рис.14).

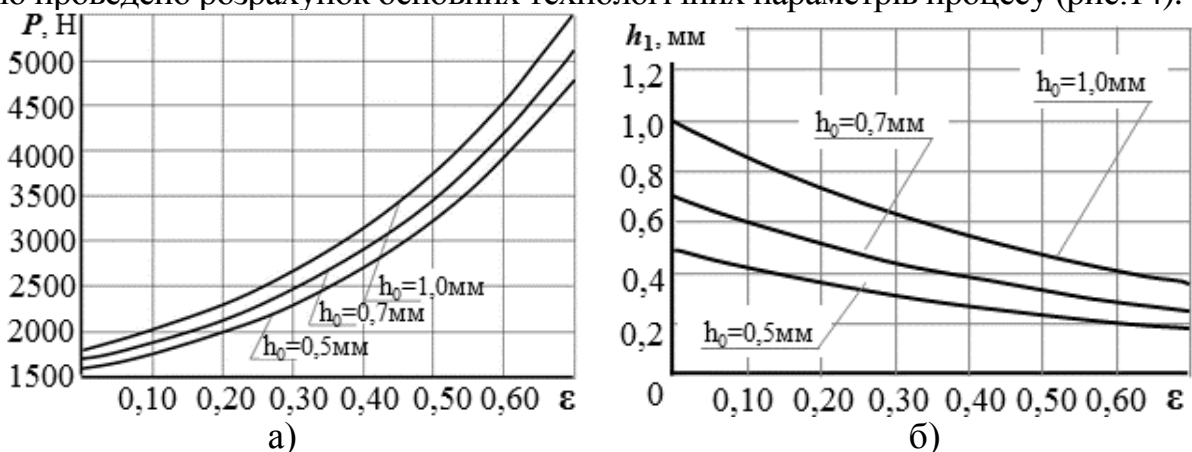


Рисунок 14 – Результати автоматизованого проектування зусиль на ролик-електроді (а) та товщини нанесеного покриття (б) залежно від ступеню деформації та початкової товщини електродної стрічки h_0

З практичної точки зору результати автоматизованого проектування технологічних режимів електроконтактного наварювання дозволяють визначити всі вихідні параметри процесу для одержання заданої товщини

нанесеного на поверхню виробу шару. В ході дослідження визначено інтегральні характеристики процесу електроконтактного наварювання.

Показано, що змінення коефіцієнту кінематичної асиметрії, який залежить від співвідношення лінійних швидкостей ролику-електроду та деталі, є перспективним напрямком керування напружено-деформованим станом електродного матеріалу, що дозволяє регулювати процес деформації і приварювання матеріалу. Це дозволяє збільшити коефіцієнт тертя в зоні приварювання, підвищуючи якість формування покриття. Коефіцієнт тертя та дотичні напруження на ролику-електроді при цьому практично не змінюються. Таким чином, забезпечується відсутність налипання електродного матеріалу на ролик-електрод, що сприяє збільшенню терміну служби обладнання для електроконтактного наварювання.

Розділ 6. Кінцево-елементне моделювання формоутворення шару та проектування гібридної нейронної системи керування процесом електроконтактного наварювання

Для перевірки прийнятих при проведенні чисельного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічками припущень розроблено кінцево-елементну модель формоутворення зносостійкого покриття при відновленні деталей, метою якого є спільне вирішення задачі електричного нагріву та пластичного деформування і приварювання електродної стрічки на поверхню деталі. Для моделювання електродної стрічки використано восьми-вузлові твердотільні редуковані елементи з тривимірним зміщенням, електричним потенціалом та температурою і з контролем руйнування Q3D8R. На рис. 15 представлені одержані в результаті розрахунку розподіли температурних полів по перетину електродного матеріалу у термодформаційному осередку при тривалості протікання імпульсу електричного струму $t_{\text{имп}}=0,04\text{с}$ (рис.15, а) та $t_{\text{имп}}=0,05\text{с}$ (рис.15, б).

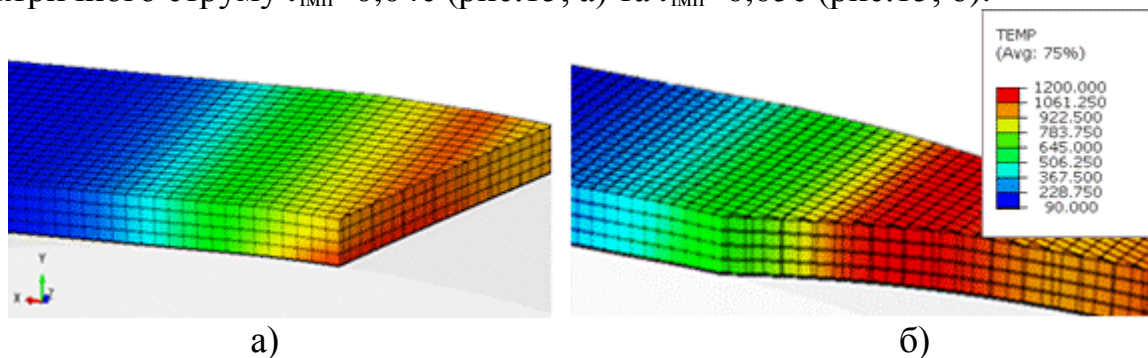


Рисунок 15 – Розподіл температурних полів по перетину електродного матеріалу у термодформаційному осередку

Теоретичні дослідження на основі розробленої кінцево-елементної моделі підтверджують вплив кінематичної асиметрії електроконтактного наварювання стрічками на зміну локальних характеристик процесу у термодформаційному осередку. Змінюється також і площа розповсюдження дотичних контактних напружень при $K_v=1,015$: у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі вони займають значно більшу площу, ніж у зоні контакту стрічки з роликом-електродом. Адекватність розробленої кінцево-елементної моделі перевірено на

основі порівняння результатів розрахунку з даними кінцево-різницевої моделі. Встановлено, що збільшення K_V до 1,015 приводить до росту дотичних контактних напружень до 37 МПа в зоні контакту електродного матеріалу з поверхнею відновлюваної деталі, у той час як в зоні контакту з роликком-електродом ці напруження практично не змінюються і складають 25 МПа (рис.16), що збігається з розрахунковими даними розробленої математичної моделі (див. рис.13, б).

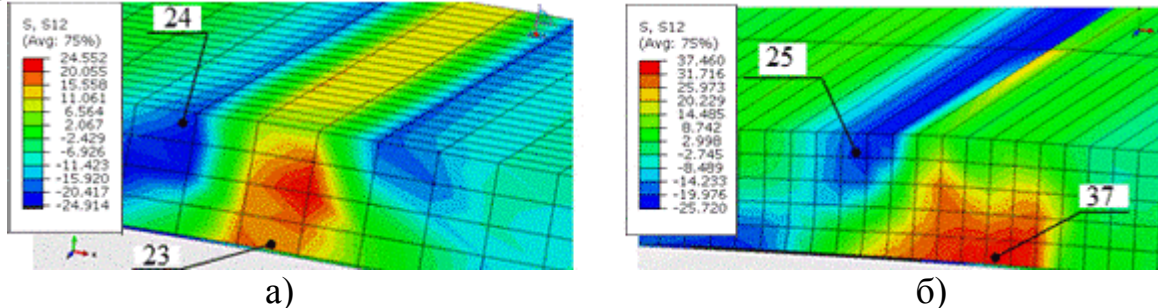


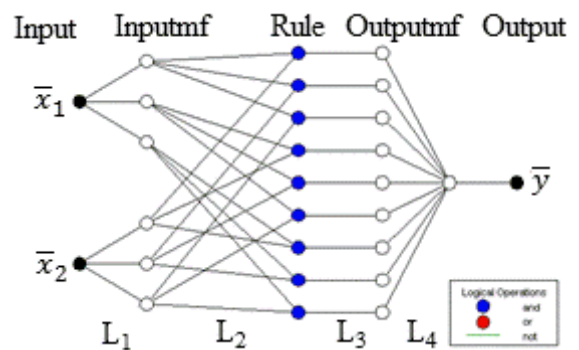
Рисунок 16 – Розподіл дотичних напружень в термдеформаційному осередку при $K_V=1.0$ (а) та при $K_V=1.015$ (б)

Похибка розрахунку дотичних контактних напружень у зоні контакту електродної стрічки з поверхнею деталі не перевищує 13%, що свідчить про достатню точність розрахунку. Проведено експериментальні дослідження міцності зчеплення поверхні деталей з покриттям, нанесеним при різних значеннях коефіцієнту кінематичної асиметрії. Результати експериментів свідчать про підвищення міцності зчеплення нанесеного шару у 1,54 рази при $K_V=1,015$.

На основі кінцево-різницевої математичної моделі процесу електроконтактного наварювання стрічками проведено синтез регулятора процесу електроконтактного наварювання з використанням методу нечіткого нейрокерування на базі гібридної багатошарової мережі з прямим розповсюдженням. З використанням додатку *MatLabFuzzyLogicToolbox* одержано базу нечітких правил (рис.17, а), а також розроблено структурну схему реалізації модуля нечіткого керування (рис.17, б). Реалізація розробленої структурної схеми модуля нечіткого керування дозволить системі управління адаптуватися до зміни термічних та силових показників режиму процесу відновлення виробів та урахувати і компенсувати змінні параметри теплового стану електродного матеріалу у термдеформаційному осередку.

- R^1 : IF (x_1 is in1mf1) AND (x_2 is in2mf1) THEN (D is out1mf1);
 R^2 : IF (x_1 is in1mf1) AND (x_2 is in2mf2) THEN (D is out1mf2);
 R^3 : IF (x_1 is in1mf1) AND (x_2 is in2mf3) THEN (D is out1mf3);
 R^4 : IF (x_1 is in1mf2) AND (x_2 is in2mf1) THEN (D is out1mf4);
 R^5 : IF (x_1 is in1mf2) AND (x_2 is in2mf2) THEN (D is out1mf5);
 R^6 : IF (x_1 is in1mf2) AND (x_2 is in2mf3) THEN (D is out1mf6);
 R^7 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf1) THEN (D is out1mf7);
 R^8 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf2) THEN (D is out1mf8);
 R^9 : IF (x_1 is in1mf3) AND (x_2 is in2mf3) THEN (D is out1mf9).

а)



б)

Рисунок 17 – База нечітких правил (а) та структурна схема модулю нечіткого керування (Fuzzy) (б)

Результати дисертаційної роботи впроваджено в умовах ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ЗАТ «Краматорський завод металоконструкцій» (м. Краматорськ), ПрАТ «Завод напівпровідників» (м. Запоріжжя), ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк), ТОВ «Науково-виробнича компанія «Регіон Інноватика Еніон-Балтика» (м. Донецьк), фермерського господарства «Діхтер» (Слов'янський р-н) з загальним економічним ефектом 2451 тис. грн. за рахунок підвищення ефективності ремонтних заходів, якості поверхневого шару відновлених деталей, зниження витрат металу та енерговитрат.

Технологічні рекомендації, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, які дозволяють керувати якістю зони приварювання покриття з деталлю та саме покриття при відновленні зношених поверхонь електроконтактним наварюванням, було використано при розробці технічних пропозицій для ремонту дефектів деталей вантажопідйомних об'єктів за госпдоговорами з ПАТ Снежнянський машинобудівний завод «Мотор-Січ», ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат», ПАТ «Кримський содовий завод» протягом 2012-2013 рр. Це дозволило підвищити міжремонтний термін служби на 20%, знизити витрати на придбання запасних частин у 1,5 рази.

Програмні засоби з автоматизованого розрахунку процесу формування нанесеного електроконтактним методом шару та практичні рекомендації, які забезпечують одержання стабільно високої якості нанесеного шару з необхідними показниками механічних характеристик, використано в Державному підприємстві «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь» (м. Харків) Міністерства промислової політики України та у ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ) при проектуванні технології та обладнання для зміцнення та відновлення деталей на спеціалізованих ділянках підготовки виробництва.

Результати роботи у рамках угоди про науково-технічну співпрацю з Донецьким фізико-технічним інститутом ім. А.А. Галкіна НАН України №ТС-06-04 (30.01.04-30.01.14) застосовані при виготовленні деталей, які працюють в умовах зношування, що дозволило підвищити їх стійкість на 37%.

Окремі положення дисертації впроваджені у навчальний процес.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації виконано нові науково-обґрунтовані розробки у галузі технології, матеріалів для електроконтактного наварювання стрічками, що забезпечують зносостійкість та якість привареного металу, економію матеріальних ресурсів на основі ефективних технологічних рекомендацій, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення терміну служби деталей.

1. Експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно до циліндричних деталей, відновлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей з наступною термічною обробкою. Встановлено, що найбільш високий опір мікропластичній

деформації спостерігається у наварених зразках зі структурою сорбіту та трооститу у зв'язку з розвинутою міжзеренною поверхнею та збільшенням числа перешкод для ковзання, що обумовлює більш високі стартові напруження (для наварених зразків зі сталі 40X після термопокращення з відпуском при 640-660°C – 59МПа та після термопокращення з відпуском при 540-560°C – 201МПа). Приварений метал, що містить великий об'єм зерен надлишкового фериту, відрізняється меншою кількістю перешкод для зсувів, а стартові напруження складають 30,5 МПа.

2. В результаті проведених досліджень розроблено режим індукційного нагріву валів діаметром 50-120 мм, наварених стрічками з конструкційних сталей, який забезпечує необхідні значення температури на поверхні та на заданій глибині прогрітого шару при постійній питомій потужності та різниці температур не більше 50°C, що забезпечує проведення нормалізації відновлених циліндричних деталей на глибину 3-5мм.

3. Експериментально встановлено, що застосування у якості охолоджуючого середовища при термообробці наварених валів теплоізолюючої суміші складу: 8-12% шарувате з'єднання графіту з коефіцієнтом терморозширення 150-170 см³/г при температурі 200-250°C, решта – графіт ГЛ1 дозволяє наблизити умови охолодження до пічних.

4. Застосування розробленої комбінованої технології відновлення валів (електроконтактне наварювання стрічками з конструкційних сталей з наступним локальним нагрівом ТВЧ до 880°C та уповільненим охолодженням у теплоізолюючій суміші) забезпечує зниження швидкості охолодження нанесеного шару від температури аустенізації до початку перлітного перетворення та підвищення середнього вмісту надлишкового фериту на 4,7% при збільшенні розміру зерна у середньому на 11мкм. Для деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження, така структура є найменш чутливою до концентрації напружень: швидкість зростання втомної тріщини знижується на 15,8-17,3%, а втомна міцність відновлених деталей підвищується на 17% зі 198МПа до 232МПа.

5. На основі експериментальних досліджень розроблено регресійні математичні моделі для визначення залежності зносостійкості та напруження відколу навареного шару від співвідношення компонентів суміші для попередньої комплексної хіміко-термічної обробки стрічки. Встановлено, що при співвідношенні $B_4C:FeTi=1:1,7$ досягається зносостійкість, близька до зносостійкості боридного шару, при одночасному підвищенні напруження відколу у 2,5 рази за рахунок рівномірного розподілу твердої складової (боридів заліза з $H_{100}=15300$ МПа) у пластичній матриці (твердий розчин феротитану з $H_{100}=2060$ МПа).

6. На основі теоретичного аналізу умов процесу електроконтактного наварювання стрічками з використанням методів кінцевих різниць та кінцевих елементів встановлено вплив на зміну локальних енергосилових параметрів процесу величини коефіцієнту кінематичної асиметрії K_v , що визначається співвідношенням лінійних швидкостей на ролику-електроді та відновлюваному виробі. Показано, що при $K_v=1,015$ збільшується площа розподілу та величина дотичних контактних напружень у зоні приварювання до 30 МПа при

збереженні незмінними дотичних контактних напружень у зоні контакту з роликом-електродом, що необхідно враховувати при проектуванні технологічного процесу відновлення деталей. Експериментально встановлено вплив K_v на міцність зчеплення привареного шару з поверхнею деталі $\sigma_{зч}$: при $K_v=1,015$ $\sigma_{зч}$ підвищується у 1,54 разі до 217 МПа.

7. На основі експериментальних досліджень процесу електроконтактного наварювання стрічками встановлена адекватність розроблених кінцево-різнецевої та кінцево-елементної моделей. Згідно з результатами проведеної експериментальної перевірки похибка обчислень при розрахунку значень зусилля на ролику-електроді та сили імпульсу струму не перевищує 10%.

8. На основі автоматизованого проектування технологічних режимів процесу електроконтактного наварювання стрічками сформульовано та вирішено програмно задачі забезпечення необхідних геометричних параметрів нанесеного шару залежно від вихідної товщини електродної стрічки, зусилля на ролику-електроді, сили імпульсу струму та величини коефіцієнту кінематичної асиметрії, що дозволило визначити всі вихідні параметри процесу та здійснити вибір електродного матеріалу.

9. На основі розробленої бази даних вихідних параметрів процесу електроконтактного наварювання побудовано структурну схему та проведено моделювання модулю нечіткого керування процесом, реалізація якого дозволить забезпечити контроль параметрів режиму протягом імпульсу зварювального струму. Це компенсує дію збурюючих факторів, які викликають утворення несплавлінь, прожогів, виплесків та інших дефектів, за рахунок навчання модуля на основі алгоритму зворотнього розповсюдження помилки.

10. Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних засобів, технічних рішень та практичних рекомендацій використано на ряді промислових підприємств України з одержанням реального економічного ефекту.

Основний зміст роботи відображено в публікаціях:

Монографії:

1. Бережная, Е.В., Гавриш, П.А., Грибков, Э.П. (2016). *Нанесение защитных покрытий порошковыми материалами: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-730-4.

Дисертантом проведено математичне моделювання формування покриття методом електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напленням.

2. Грибков, Э. П., Кассов, В. Д., Данилюк, В. А., Бережная, Е.В. (2013). *Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент: Монография*. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, ISBN: 978-966-379-652-9.

Дисертантом проведено моделювання поведінки часток порошкового середовища в термодформацийному осередку при виготовленні порошкової стрічки

Статті у фахових виданнях та виданнях, включених до НБД:

3. Berezshnaya, Olena V., Gribkov , Eduard P., Kuznetsov , Valeriy D. (2016). Investigation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 14 p., DOI: 10/1155/2016/6597317 [Web of Science, SCOPUS, Google Scholar] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель, що враховує розподіл теплових властивостей та геометричних параметрів вздовж термодформаційного осередку в процесі електроконтактного наварювання компакним матеріалом.

4. Бережная, Е.В. (2014). Управление качеством металлопокрытия при восстановлении деталей электроконтактной наплавкой. Все материалы. *Энциклопедический справочник: ежемесячный научно-технический производственный журнал*, №6, С.22-26, ISSN: 1994-6260 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

5. Кузнецов, В.Д., Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Проблемы тертя та зношування*, №3 (72), С.34-40, ISSN: 0370-2197 (Print). [e-LIBRARY, EBSCO, Google Scholar, WorldCat] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено технологію підвищення зносостійкості деталей, відновлених методом електроконтактного наплавлення, за рахунок використання комплексної хіміко-термічної обробки електродного матеріалу.

6. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Грибова, С.Н. (2016). Термонапряженное состояние износостойкого слоя при электроконтактной наплавке. *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*, Вип. 32, С.99-108, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено модель термонапруженого стану зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні циліндричних деталей, встановлено вплив температури нагріву нанесеного матеріалу на розподіл напружень та деформацій вздовж термодформаційного осередку під час наплавлення.

7. Бережная, Е.В., Грибова, С.Н. (2013). Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1 (14), С.206-213, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу формозміни електродного матеріалу при електроконтактному наплавленні.

8. Чепель, Ю.А., Бережная, Е.В., Кассов, В.Д. (2013). Микропроцессорная система управления электроконтактной наплавкой двумя роликовыми электродами. *Проблемы машиностроения*, №5, С.42-45, ISSN: 0131-2928 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено мікропроцесорну систему керування електроконтактним наплавленням двома роликовими електродами.

9. Бережная, Е.В. (2017). Влияние структуры металлопокрытия на сопротивление развитию трещин. *Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університету*, Вып. 77, С.147-151, ISSN: 2219-5548 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

10. Бережная, Е.В. (2017). Выбор режима индукционного нагрева для нормализации наплавленных поверхностей цилиндрических деталей. *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*, Вип. 34, С.115-123, ISSN: 2225-6733 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

11. Бережная, Е.В., Кузнецов, В.Д., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. (2017). Исследование микропластической деформации металла, наплавленного электроконтактным методом. *Автоматическая сварка*, №7, С.24-28, ISSN: 0005-111X (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання]

Дисертантом досліджено структурний фактор мікропластичності зразків, наплавлених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей.

12. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Цывинда, Н.И. (2014). Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса восстановления деталей землеройных машин методом электроконтактной наплавки. *Гірничий вісник: науково-технічний збірник*, Вип. 97, С.201-205, ISSN: 2306-5435 (Print). [e-LIBRARY, index COPERNICUS] [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити основні технологічні параметри процесу електроконтактного наплавлення циліндричних деталей.

13. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Электроконтактное упрочнение слоя, нанесенного газотермическим напылением. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць*, № 1, С.173-180, ISSN: 2218-1806 (Print). [e-LIBRARY] [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель процесу електроконтактного зміцнення шару, нанесеного газотермічним напиленням.

14. Бережная, Е.В., Кассов, В.Д., Чепель, Ю.А. (2014). Структура системы управления микроконтроллером электроконтактной наплавки. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №1 (13E), С.16-21, ISSN: 2219-7869 (Online).

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(13%D0%95\)_2014/nomer_1\(13E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(13%D0%95)_2014/nomer_1(13E)_2014.html). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено структуру системи керування силовою частиною обладнання для електроконтактного наплавлення.

15. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П. (2014). Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №6, Ч.2, С.93-96, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання]

Дисертантом розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу в термодформаційному осередку при електроконтактному наплавленні на основі методу полів ліній ковзання.

16. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гущин, А.М. (2014). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(32), С.6-9, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя для дослідження триботехнічних параметрів матеріалів, що піддаються інтенсивному зношуванню.

17. Бережная, Е.В. (2011). Восстановление деталей станочного оборудования электроконтактной наплавкой порошковой проволокой. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць*, №29, С.175-179, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

18. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2012). Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки. *Обработка материалов давлением*, №1 (30), С.61-64, ISSN: 20762151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для математичного моделювання напружено-деформованого стану при виготовленні електродного матеріалу для електроконтактного наплавлення.

19. Грибков, Э.П., Данилюк, В.А., Бережная, Е.В. (2012). Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, №13 (184), Ч.1, С.74-79, ISSN: 1998-7927 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом визначено основні статистичні характеристики виготовлення електродного матеріалу для електроконтактного наварювання.

20. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2012). Микроконтроллерная система мониторинга интенсивности износа наплавленного металла. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №2(27), С.141-144, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено мікроконтролерну систему моніторингу триботехнічних параметрів наплавленого металу.

21. Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Селедцов, А.С. (2012). Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред. *Обработка материалов давлением*, №3(32), С.137-141, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертант прийняв участь у розробці методики визначення фізико-механічних властивостей дискретних середовищ при їх ущільненні.

22. Бережная, Е.В. (2012). Современные методы повышения износостойкости землеройной техники. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №3 (28), С.33-36, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

23. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А. (2012). Машина трения для испытания на износостойкость металла наплавки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №31, С.112-117, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено машину тертя зворотно-поступового руху.

24. Сатонин, А.В., Кассов, В.Д., Бережная, Е.В., Данилюк, В.А., Махмудов, К.Д. (2013). Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки. *Обработка материалов давлением*, №1 (34), С.30-35, ISSN: 2076-2151 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено математичну модель електроконтактного наплавлення осесиметричних тіл обертання металевими стрічками.

25. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Кассов, В.Д. (2013). Устройство сжатия сварочных роликов для электроконтактной наплавки. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1 (30), С.143-148, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено пристрій стискання роликів-електродів для електроконтактного наплавлення.

26. Турчанин, М.А., Бережная, Е.В., Малыгина, С.В. (2013). Технико-экономические преимущества электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №32, С. 198-201, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору методу відновлення деталей, що працюють в умовах зношування

27. Данилюк, В.А., Грибков, Э.П., Бережная, Е.В., Разумович, О.О. (2013). Совершенствование технологии изготовления порошковых проволок сложной конструкции для восстановления деталей технологического оборудования. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №33, С. 47-51, ISSN: 2222-9000 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено конструкцію електродного матеріалу для наварювання.

28. Бережная, Е.В. Гуцин, А.М., Турчанин, М.А. (2015). Гибкоперенастраиваемый триботехнический комплекс для исследования износостойкости и долговечности наплавленных режущих элементов рабочих органов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1(34), С. 10-13, ISSN: 1993-8322 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом розроблено принципову електрокінетичну схему триботехнічного комплексу для імітаційного моделювання процесу зношування.

29. Бережная, Е.В., Грибков, Э.П., Кузнецов, В.Д. (2017). Численное математическое моделирование процесса консолидации порошковой среды электроконтактным методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, №6 (1228), С. 15-20, ISSN: 2222-0631 (Print). [Фахове видання].

Дисертантом проведено дослідження впливу технологічних режимів електроконтактного наварювання на розподіл температурних полів у термодеомаційному осередку.

Інші видання:

30. Berezshnaya, O., Chepel, Ju., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2015). Development of welding equipment for the production of layered tapes. *Metallurgical and Mining Industry*, №12, pp.332-338, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено технологію та обладнання для виготовлення багатошарової електродної стрічки для електроконтактного відновлення зношених деталей.

31. Berezshnaya, O., Kuznetsov, V., Tsyvinda, N., Pikilnyak, A. (2016). Determining of the structural schemes and performance of linear DC motor control system for welding equipment development in the layered tapes production. *Metallurgical and Mining Industry*, №1, pp.154-157, ISSN: 20760507 (Print)

Дисертантом розроблено конструктивні особливості обладнання для виготовлення багатошарових стрічок для електроконтактного наварювання

32. Бережная, Е.В., Лапченко, А.В. (2016). Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, №38, С.125-131, ISSN: 2222-9000.

Дисертантом досліджено вплив комбінованої технології відновлення на фізичний стан шару, нанесеного електроконтактним методом.

33. Кассов, В.Д., Грибков, Э.П., Грибкова, С.Н., Бережная, Е.В. (2016). Конечно-элементное моделирование внедрения твердых частиц в оболочку при прокатке порошковых лент. *Обработка материалов давлением*, №2 (43), С.36-40, ISSN: 2076-2151 (Print).

Дисертантом проведено вибір вихідних даних для кінцево-елементного моделювання впровадження твердих часток при виготовленні порошкових стрічок.

34. Гавриш, П.А., Бережная, Е.В., Соболев-Бутовченко, Е.А. (2016). Газотермическое напыление антифрикционного покрытия деталей перегружателя TAKRAF. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*, №2 (20E), С. 49-54, ISSN: 2219-7869 (Online). [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(20%D0%95\)_2016/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(20%D0%95)_2016/article/10.pdf).

Дисертантом розроблено методику проведення експериментів.

35. Бережная, Е.В., Разживин, А.В. (2014). Построение интеллектуальной системы управления процессом электроконтактной наплавки. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*, №1, С.49-55, ISSN: 2313-1020 (Print). [e-LIBRARY].

Дисертантом розроблено інтелектуальну систему керування процесом електроконтактного наплавлення з послідовним увімкненням програмного та нейронного регуляторів.

36. Бережная, Е.В. (2017). Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. *Актуальные проблемы в машиностроении: Международная научно-практическая конференция (Новосибирск)*. №1, С.126-131, ISSN: 2313-1020. [e-LIBRARY].

37. Berezshnaya, Olena, Razzhivin, Aleksey, Zubenko, Ekaterina (2016). Synthesis of Neural Network Regulator for Electrocontact Surfacing on the Basis of Fuzzy Control Module. *Proceedings of the International Symposium on Embedded Systems and Trends in Teaching Engineering: TEMPUS (Nitra)*, pp.189-194, ISBN: 978-80-558-1041-6.

Дисертантом розроблено методика синтезу регулятору електроконтактного наварювання та модуля нечіткого нейронного керування.

38. Бережная, Е.В. (2011). Перспективные направления снижения затрат на восстановление деталей подъемно-транспортного оборудования, работающих в условиях абразивного износа. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: IX Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.16, ISBN: 978-966-379-640-6.

39. Бережная, Е.В. (2011). Энерго- и ресурсосберегающая технология восстановления изношенных деталей дорожно-строительной техники. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 3-я міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.61-63.

40. Бережная, Е.В. (2012). Стабилизация процесса электроконтактной наплавки режущего инструмента. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: X Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 13, ISBN: 978-966-379-640-6.

41. Бережная, Е.В., Чепель, Ю.А., Гущин, В.М. (2012). Модернизация машины трения для исследования триботехнических параметров материалов. *Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування: 4-а міжвузівська науково-технічна конференція (Донецьк)*, С.120.

Дисертантом здійснено постановку наукового завдання дослідження, вибір наукового підходу до його розв'язання.

42. Бережная, Е.В. (2013). К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: IV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 31, ISBN: 978-966-379-647-5.

43. Разживин, А.В., Бережная, Е.В. (2014). Система автоматизации процесса управления тепловым режимом электроконтактной наплавки. *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Международная научно-техническая конференция (Вологда)*, С. 174-176, ISBN: 978-5-87851-522-1.

Дисертантом здійснено обґрунтування вибору системи автоматизованого керування процесом електроконтактного наплавлення.

44. Бережная, Е.В. (2015). Тепловые процессы при консолидации порошковой среды электроконтактным способом. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIII міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 14, ISBN: 978-966-379-640-6.

45. Бережная, Е.В. (2015). Повышение ресурса работы технологического оборудования литейных цехов комбинированной обработкой. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: V Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С. 30-32, ISBN: 978-966-379-647-5.

46. Бережна, О.В., Разживін, О.В. (2016). Розробка бази даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення деталей машин. *Проблеми та перспективи розвитку науки і техніки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, С. 53.

Дисертантом розроблено базу даних автоматизованої системи керування процесом електроконтактного наплавлення та проведено перевірку її інформативності.

47. Бережная, Е. В. (2016). Стойкость восстановленных валов, работающих в условиях циклического нагружения. *Университетская наука – 2016: Международная научно-техническая конференция (Мариуполь)*, Т. 2, С. 130–131.

48. Бережная, Е.В. (2016). Выбор режима нагрева наплавленной цилиндрической детали токами высокой частоты. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XIV Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.14, ISBN: 978-966-379-640-6.

49. Бережная, Е.В. (2017). Моделирование теплового состояния композиционного материала при электроконтактной наплавке. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VII Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів)*, С. 61-63.

50. Бережная, Е.В. (2017). Термічна обробка відновлених електроконтактним методом циліндричних деталей. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві: VI Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ)*, С.18. ISBN: 978-966-379-647-5.

51. Бережная, Е.В. (2017). Повышение надежности деталей методом комбинированной обработки поверхности. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки: Всеукраїнська науково-технічна конференція (Дніпро)*, Ч. 2, С. 282-284.

Патенти:

52. Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов, В.Д., Наливайко, О.М. Машина тертя зворотньо-поступального руху. Патент №85987 України на корисну модель. МПК G01N3/56(2006.01). №и 2013 06952. Заявл. 03.06.2013. Опубл. 10.12.2013. Бюл.№23. 4с.

53. Грибков, Е.П., Чепель, Ю.А., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Кассов В.Д. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84241 України на корисну модель. МПК B23K 35/40(2006.01). №и 2013 05779. Заявл. 07.05.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл.№ 19. 4с.

54. Грибков, Е.П., Данилюк, В.О., Бережна, О.В., Чепель, Ю.А. Спосіб виготовлення порошкового дроту. Патент №84906 України на корисну модель. МПК B23K 35/40 (2006.01). №и 2013 03311. Заявл. 18.03.2013. Опубл. 11.11.2013. Бюл.№21. 4с.

55. Сатонин, О.В., Бережна, О.В., Малигіна, С.В. Спосіб електроконтактного наплавлення. Патент №88576 України на винахід. МПК B23K 35/00 (2006.01). №и 2013 10799. Заявл. 09.09.2013. Опубл. 25.03.2014. Бюл.№.6. 4с.

56. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Кассов, В.Д., Гавриш, П.А. Спосіб визначення зварюваності різнорідних металів. Патент №106718 України на корисну модель. МПК B23K 31/12 (2006.01). №и 2015 08944. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 10.05.2016. Бюл. №9. 4с.

57. Бережна, О.В., Турчанін, М.А., Гушчін, А.М. Стенд для випробування на надійність ріжучих елементів машин. Патент №107668 України на корисну

модель. МПК G01N 3/56 (2006.01). №и 2015 08938. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 24.06.2016. Бюл. №12. 5с.

58. Бережна, О.В., Кузнєцов, В.Д. Спосіб оцінювання міцності зчеплення зносостійкого шару, нанесеного електроконтактним методом. Патент №116024 України на корисну модель. МПК G01N 19/04 (2006.01). №и 2016 09945. Заявл. 28.09.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 4с.

59. Бережна, О.В., Лапченко, О.В., Кузнєцов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №116099 України на корисну модель. МПК B23K 11/00, B22D 19/00, B22D 19/06 (2006.01). №и 2016 11237. Заявл. 07.11.2016. Опубл. 10.05.2017. Бюл. №9. 3с.

60. Бережна, О.В., Грибков, Е.П., Кузнєцов, В.Д. Спосіб відновлення поверхонь деталей електроконтактним наплавленням. Патент №118044 України на корисну модель. МПК B23K 11/00, B22D 19/00, B22D 19/06 (2006.01). №и 2016 12406. Заявл. 06.12.2016. Опубл. 25.07.2017. Бюл. №14. 4с.

АНОТАЦІЯ

Бережна О.В. Розвиток наукових і технологічних основ підвищення ефективності та якості зносостійкого електроконтактного наварювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено розвитку наукових засад і методів автоматизованого розрахунку та проектування процесу зносостійкого електроконтактного наварювання стрічками, а також розробці практичних рекомендацій з удосконалення технологій виготовлення електродних матеріалів та відновлення зношених поверхонь.

При проектуванні відновлювальних операцій на основі процесів електроконтактного наварювання з використанням розрахункових методів призначення технологічних умов нарощування поверхневого шару пред'являються наступні основні вимоги, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості: міцність зчеплення нанесеного шару з основою, зносостійкість та втомна міцність.

В роботі експериментально підтверджено вплив коефіцієнту зміцнення на чутливість до концентрації напружень стосовно зразків, наварених стрічками з конструкційних вуглецевих сталей з наступною термічною обробкою. На основі одержаних результатів експериментальних досліджень розроблено комбіновану технологію відновлення циліндричних деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження. Запропонована технологія включає операції електроконтактного наварювання з наступним локальним нагрівом ТВЧ та уповільненим охолодженням в теплоізолюючій суміші, що містить у своєму складі шаруваті з'єднання графіту. Застосування розробленої комбінованої технології відновлення деталей дозволило знизити швидкість зростання втомної

тріщини у поверхневому шарі та підвищити втомну міцність відновлених деталей.

На основі проведених експериментальних досліджень розроблено технологію виготовлення електродного матеріалу, яка дозволяє створити у привареному поверхневому шарі структуру, що складається з пластичної матриці (твердий розчин) та рівномірно розподілених у ній твердих складових (боридів заліза), за рахунок чого навантаження, що сприймається поверхнею виробу, перерозподіляється по площі покриття, знижуючи ймовірність руйнування. Запропонована технологія виготовлення електродного матеріалу забезпечує високі показники зносостійкості та напруження відколу покриття, нанесеного електроконтактним методом.

Розроблено числову математичну модель процесу електроконтактного наварювання електродними стрічками, що базується на числовому рекурентному вирішенні умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму термодформаційного осередку. Особливістю запропонованої математичної моделі є коректне урахування розподілу теплових характеристик електродного матеріалу вздовж термодформаційного осередку, що відіграє важливу роль у формуванні з'єднання в процесі наварювання. Встановлено вплив величини коефіцієнту кінематичної асиметрії на зміну локальних енергосилових характеристик процесу. Прийняті при кінцево-різнецевому моделюванні допущення підтверджено результатами кінцево-елементного моделювання процесу електроконтактного наварювання стрічками. Адекватність розробленої математичної моделі підтверджена експериментальними дослідженнями. Експериментально встановлено, що збільшення коефіцієнту кінематичної асиметрії процесу електроконтактного наварювання сприяє підвищенню міцності зчеплення.

На основі розробленої математичної моделі виконано автоматизоване проектування технологічних режимів процесу електроконтактного наварювання стрічками. На основі розробленої бази даних вихідних параметрів процесу електроконтактного наварювання побудовано структурну схему та проведено моделювання модулю нечіткого керування процесом, реалізація якого забезпечує контроль параметрів режиму протягом імпульсу зварювального струму.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в умовах ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ЗАТ «Краматорський завод металоконструкцій» (м. Краматорськ), ПрАТ «Завод напівпровідників» (м. Запоріжжя), ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (м. Сєверодонецьк), ТОВ «Науково-виробнича компанія «Регіон Інноватика Еніон-Балтика» (м. Донецьк), фермерського господарства «Діхтер» (Слов'янський р-н) з загальним економічним ефектом 2451 тис. грн. за рахунок підвищення ефективності ремонтних заходів, якості поверхневого шару відновлених деталей, зниження витрат металу та енерговитрат.

Ключові слова: електродна стрічка, електроконтактне наварювання, кінцево-різницева математична модель, кінцево-елементна модель, режими електроконтактного наварювання.

АННОТАЦИЯ

Бережная Е.В. Развитие научных и технологических основ повышения эффективности и качества износостойкой электроконтактной наварки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 – «Сварка и родственные процессы и технологии» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена развитию научных основ и методов автоматизированного расчета и проектирования процесса износостойкой электроконтактной наварки лентами, а также разработке практических рекомендаций по усовершенствованию технологий изготовления электродных материалов и восстановления изношенных поверхностей.

При проектировании восстановительных операций на основе процессов электроконтактной наварки с использованием расчетных методов определения технологических условий наращивания поверхностного слоя предъявляются следующие основные требования, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства: прочность сцепления приваренного слоя с основой, износостойкость и усталостная прочность.

В работе экспериментально подтверждено влияние коэффициента упрочнения на чувствительность к концентрации напряжений применительно к образцам, наваренным лентами из конструкционных углеродистых сталей с последующей термической обработкой. На основе полученных результатов экспериментальных исследований разработана комбинированная технология восстановления цилиндрических деталей, работающих в условиях циклического нагружения. Предложенная технология включает операции электроконтактной наварки с последующим локальным нагревом ТВЧ и замедленным охлаждением в теплоизолирующей смеси, содержащей в своем составе слоистые соединения графита. Применение разработанной комбинированной технологии восстановления деталей позволило снизить скорость подрастания усталостной трещины в поверхностном слое и повысить усталостную прочность наваренных деталей.

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана технология изготовления электродного материала, которая позволяет получить в наваренном поверхностном слое структуру, состоящую из пластичной матрицы (твердый раствор) и равномерно распределенных в ней твердых составляющих (боридов железа), за счет чего воспринимаемые поверхностью изделия нагрузки перераспределяются по площади покрытия, снижая вероятность разрушения. Предложенная технология изготовления электродного материала обеспечивает высокие показатели износостойкости и напряжения откола покрытия, нанесенного электроконтактным методом.

Разработана численная математическая модель процесса электроконтактной наварки электродными лентами, основанная на численном рекуррентном решении условия статического равновесия выделенного элементарного объема термодиформационного очага. Особенностью предложенной математической

модели является корректный учет распределения тепловых характеристик электродного материала вдоль термомодеформационного очага, что играет важную роль при формировании соединения в процессе наварки. Установлено влияние величины коэффициента кинематической асимметрии на изменение локальных энергосиловых характеристик процесса. Принятые при конечно-разностном моделировании допущения подтверждены результатами конечно-элементного моделирования процесса электроконтактной наварки лентами. Адекватность разработанной математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Экспериментально установлено, что увеличение коэффициента кинематической асимметрии процесса электроконтактной наварки способствует повышению прочности сцепления.

На основе разработанной математической модели выполнено автоматизированное проектирование технологических режимов процесса электроконтактной наварки лентами. На основе разработанной базы данных исходных параметров процесса электроконтактной наварки построена структурная схема и проведено моделирование модуля нечеткого управления процессом, реализация которого обеспечивает контроль параметров режима в течение импульса сварочного тока.

Выполненные научные исследования и предложенные на их основе практические решения подтверждены в условиях ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск), ЗАО «Краматорський завод металоконструкцій» (г. Краматорск), ЧАО «Завод напівпровідників» (г. Запоріжжє), ЧАО «Сєверодонецьке об'єднання АЗОТ» (г. Северодонецк), ООО «Науково-виробнича компанія «Регіон Інноватика Еніон-Балтика» (г. Донецьк), фермерського господарства «Діхтер» (Славянський р-н) с общим экономическим эффектом 2451 тыс. грн.

Ключевые слова: электродная лента, электроконтактная наварка, конечно-разностная математическая модель, конечно-элементная модель, режимы электроконтактной наварки.

SUMMARY

Berezshnaya E.V. Development of scientific and technological fundamentals for improving efficiency and quality of wear-resistant electrocontact surfacing. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.03.06 – «Welding and related processes and technologies» – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the development of scientific fundamentals and methods for automated calculation and design of the wear-resistant electrocontact surfacing process by strips, including the development of practical recommendations for improving the manufacturing electrode materials and restoring worn-out surfaces technologies.

When designing recovery operations based on the electrocontact surfacing using the calculation methods for determining the technological conditions for

increasing the surface layer, the following basic requirements are met. They ensure the necessary performance properties: adhesion strength of the welded layer to the substrate, wear resistance and fatigue strength.

The work experimentally confirmed the effect of the strengthening coefficient on the sensitivity to the stress concentration applied to samples deposited by strips of structural carbon steels with subsequent heat treatment. Based on the results of experimental studies, a combined technology for the recovery of cylindrical parts working under cyclic loading conditions was developed. The proposed technology includes electrocontact surfacing operations followed by local heating of RF current and delayed cooling in a heat-insulating mixture containing graphite laminate compounds. The use of the developed combined technology for the restoration of parts made possible the reduction of the growth rate of the fatigue crack in the surface layer and the increasing of the deposited parts' fatigue strength.

On the basis of the experimental studies, the technology for electrode material fabrication was developed. It helps to obtain in the deposited surface layer a structure consisting of a plastic matrix (solid solution) and uniformly distributed solid components (iron borides), wherewith the loads perceived by the product surface are redistributed over the coating area, reducing the destruction probability. The proposed technology for manufacturing the electrode material provides high wear resistance and a breakdown stresses of the coating deposited by the electrocontact method.

A numerical mathematical model of the electrocontact surfacing process by electrode strips is developed. It's based on a numerical recurrence solution of the static equilibrium condition for the selected elementary volume of the thermal deformation hearth. A peculiarity of the proposed mathematical model is the correct consideration of the electrode material thermal characteristics distribution along the thermal deformation focus, which plays an important role in the formation of the joint during the surfacing process. The effect of the kinematic asymmetry magnitude coefficient on the change in the local energy-force characteristics of the process is established. The assumptions made under finite difference modeling are confirmed by the results of finite element modeling of the electrocontact surfacing by tapes. The sufficiency of the developed mathematical model is confirmed by experimental studies. It was experimentally established that an increase of kinematic asymmetry coefficient in the electrocontact surfacing process contributes to the increase in the adhesion strength.

On the basis of the developed mathematical model, the technological regimes automated design of the electrocontact surfacing by tapes is performed. Based on the developed database of the electrocontact surfacing process initial parameters, a structural diagram was constructed and a simulation of the fuzzy process control module was implemented. Its implementation provides control over the regime parameters during the welding current pulse.

Key words: electrode tape, electrocontact surfacing, finite-difference mathematical model, finite element model, electrocontact surfacing modes.

Підп. до друку 27.04.2018 Формат 60х84 /16 Ум.-друк. арк. 1,9
Обл.-вид. арк. 1,9 Тираж 100 прим. Зам. № 66

Видавець і виготівник
«Донбаська державна машинобудівна академія»
84313 м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру
серія ДК № 1633 від 24.12.2003.

